

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征 ..... 高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)

杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征 ..... 徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)

太原市采暖季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属健康风险评价 ..... 李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)

成都市城区 PM<sub>2.5</sub> 中二次水溶性无机离子污染特征 ..... 李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)

北京市臭氧的时空分布特征 ..... 王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)

南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 ..... 安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)

祁连山中段降水化学的环境意义研究 ..... 李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)

中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化 ..... 孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)

本底大气 CO<sub>2</sub> 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估 ..... 刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)

轻型汽油车 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放因子研究 ..... 何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)

煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究 ..... 孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)

春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N<sub>2</sub>O 的分布和海-气交换通量 ..... 王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)

珠江口水体组分的吸收特性分析 ..... 王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)

河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例 ..... 闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)

基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究 ..... 魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)

百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征 ..... 冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)

自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响 ..... 郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)

垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制 ..... 张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)

三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响 ..... 张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)

纳米 TiO<sub>2</sub> 对底泥中汞释放及活化的影响 ..... 张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)

首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析 ..... 高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)

石化工业园区有毒废水来源识别研究 ..... 杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)

污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子 ..... 李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)

2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究 ..... 刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征 ..... 席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)

MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析 ..... 魏健,宋永会,赵乐(4610)

制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究 ..... 曾国驱,贾晓珊(4618)

生物滤池工艺的数值模拟与运行优化 ..... 邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)

气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响 ..... 李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)

给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 ..... 王建军,李田,张颖(4642)

北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染 ..... 白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)

电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险 ..... 唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)

广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价 ..... 谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)

崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征 ..... 耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)

啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析 ..... 周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)

氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响 ..... 陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)

土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 ..... 李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)

上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析 ..... 唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)

某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究 ..... 刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)

海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究 ..... 孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)

盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素 ..... 汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)

不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性 ..... 王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)

碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO<sub>2</sub> 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响 ..... 周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)

国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究 ..... 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)

我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考 ..... 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)

《环境科学》第35卷(2014年)总目录 ..... (4767)

《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)

# 电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险

唐斌<sup>1,2</sup>, 罗孝俊<sup>1\*</sup>, 曾艳红<sup>1,2</sup>, 麦碧娴<sup>1</sup>

(1. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 对一受电子垃圾污染池塘内两种鱼类(鲮鱼和乌鳢)体内各组织中多氯联苯(PCBs)及其甲磺基代谢产物(MeSO<sub>2</sub>-PCBs)进行了分析. 鲮鱼和乌鳢体内各组织中总 PCBs ( $\sum$  PCBs) 的平均含量分别为 560 ~ 10 462 ng·g<sup>-1</sup> 和 580 ~ 50 492 ng·g<sup>-1</sup> (湿重), 两种鱼体内肝脏中的 PCBs 含量均高于其他组织. PCBs 在鱼体组织内的分布与不同组织的脂肪含量有关. 鲮鱼和乌鳢体内各组织中  $\sum$  MeSO<sub>2</sub>-PCBs 的平均含量分别为 0.44 ~ 53 ng·g<sup>-1</sup> 和 1.86 ~ 132 ng·g<sup>-1</sup>, 这一浓度水平比之前国外报道的最高浓度高 1 个数量级. 除 PCB149 外, 鲮鱼体内手性 PCB 单体的 EF 值与沉积物相比存在下降趋势; 而在乌鳢体内则正相反, 在鲮鱼体内已下降的 EF 值在乌鳢体内则出现回升, 有些单体的 EF 值甚至高于沉积物. 这一结果可能表明 PCBs 在两种鱼体内的手性选择性代谢特征正好相反. 鱼体内高含量的  $\sum$  PCBs 和  $\sum$  MeSO<sub>2</sub>-PCBs 对当地居民具有较高的暴露风险, 因此, 限制这些鱼类在市场的流通对于降低当地居民健康风险具有重要意义.

**关键词:** 多氯联苯; 甲磺基代谢产物; 组织分配; 对映体选择性代谢; 暴露风险

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4655-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.032

## Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure

TANG Bin<sup>1,2</sup>, LUO Xiao-jun<sup>1</sup>, ZENG Yan-hong<sup>1,2</sup>, MAI Bi-xian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In the present study, we determined polychlorinated biphenyls and their methylsulfonyl metabolites (MeSO<sub>2</sub>-PCBs) in the tissues of two fish species-mud carp and northern snakehead-from a natural pond in an electronic waste recycling site in the Pearl River Delta, Southern China. The mean concentrations of PCBs ( $\sum$  PCBs) varied from 560 to 10 462 ng·g<sup>-1</sup> wet weight, and from 580 to 50 492 ng·g<sup>-1</sup> wet weight in the tissues of mud carp and northern snakehead, respectively, with the highest levels found in the liver. Lipid contents played an important role in the determination of tissue distribution of PCBs. The mean concentrations of  $\sum$  MeSO<sub>2</sub>-PCBs varied between 0.44 and 53 ng·g<sup>-1</sup> wet weight in tissues of mud carp, while varied between 1.86 and 132 ng·g<sup>-1</sup> wet weight in northern snakehead. These levels were one order of magnitude greater than the highest levels of MeSO<sub>2</sub>-PCBs previously reported in fish. The EF values of chiral PCBs in mud carp were lower than those in the sediments, with an exception of PCB149. However, the declined EFs in mud carp were rebounded in northern snakehead, and some values were even higher than those in the sediment. This result may suggest that the mud carp and the northern snakehead preferred to biotransform different enantiomers of PCB congeners. The elevated levels of  $\sum$  PCBs and  $\sum$  MeSO<sub>2</sub>-PCBs detected in the present study indicated a high exposure risk to the local residents. Restricting the consumption of these fish in the local markets is important and essential for reducing the health risks to local residents.

**Key words:** polychlorinated biphenyls (PCBs); methylsulfonyl-metabolites; tissue distribution; enantiomer selective metabolism; exposure risk

多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 是一类人工合成的氯代芳烃化合物, 因其合成工艺简单、成本低廉, 且具有良好的理化特性 (如极好的化学稳定性、热稳定性、导热性和绝缘性等) 等优点, 曾广泛应用于电力工业、塑料加工业、化工和印刷等领域<sup>[1]</sup>. 研究表明, PCBs 具有致癌性, 并可对免疫、生殖和神

经系统等产生危害<sup>[2,3]</sup>, 而且其亲脂性较强, 易在生物

收稿日期: 2014-05-07; 修订日期: 2014-06-16

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (201309030-02); 国家自然科学基金项目 (41273118)

作者简介: 唐斌 (1990 ~ ) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为有机污染物的环境行为, E-mail: tangbin@gig.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: luoxiaoj@gig.ac.cn

体内富集,从而对生态环境和人体健康产生毒害作用. 尽管早在 20 世纪 70 年代 PCBs 就已被禁止生产和使用,并于 2001 年被列入《斯德哥尔摩 POPs 公约》首批受控制名单,但由于其在环境中的持久性,依然在许多环境介质中被检出. 特别是近年来大量国外电子废弃物通过非法途径进入我国,这些电子垃圾在一些地区(主要是农村或者城市郊区)进行粗放式的拆解,成为我国环境中 PCBs 的重要来源<sup>[4]</sup>.

PCBs 在生物体内可以受酶的诱导发生生物转化,生成新的代谢产物<sup>[5]</sup>. 甲磺基多氯联苯(methylsulfonyl-polychlorinated biphenyls, MeSO<sub>2</sub>-PCBs)是多氯联苯(PCBs)在生物体内经肝脏微粒体 P450 酶氧化并经硫醚氨酸代谢途径(mercapturic acid pathway, MAP)产生的一类新型污染物<sup>[6,7]</sup>. 毒理试验表明,MeSO<sub>2</sub>-PCBs 对生物具有细胞毒性、免疫毒性和生殖毒性等毒害作用<sup>[5]</sup>,而且甲磺基代谢产物比 PCBs 具有更强的持久性<sup>[8]</sup>,尽管 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 的亲脂性与其母体相比较低,仍极易在食物链中富集<sup>[5]</sup>.

由于氯原子取代位置的差异,209 种 PCBs 同系物中有 78 种因分子存在手性轴而具有手性,其中 19 种可在室温下稳定存在<sup>[9]</sup>. 理化过程(如物理迁移、挥发、溶解和化学降解等)不能改变这些 PCBs 的手性组成,但生物过程(如生物体内的代谢转化等)则有可能改变手性 PCBs 的对映体组成<sup>[9]</sup>. 因此,PCBs 的手性组成特征有助于了解其在生物体内的代谢转化过程.

尽管已有关于电子垃圾拆解区水生生物(鱼类)受 PCBs 污染的报道<sup>[10,11]</sup>,然而,这些研究主要集中于整鱼或者肌肉、肝脏等组织,PCBs 在鱼类体内其他组织内的富集则较少有报道. 由于生物体内各个组织和器官各有其不同的组成和功能,因此了解污染物(PCBs)在这些组织中的分布是十分必要的. 在本研究中,笔者对采集自中国南方一受电子垃圾污染的池塘中的鲮鱼(*Cirrhinus molitorella*)和乌鳢(*Ophicephalus argus*)样品不同组织中的 PCBs 和 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 进行了分析,对其同系物组成、组织差异性分配、以及主要手性单体的手性特征进行了探讨,考虑到鱼类也是重要的人体 PCBs 暴露来源<sup>[10,12]</sup>,在本研究中笔者也初步评估了食鱼对当地居民的 PCBs 暴露贡献.

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 样品的采集

5 条鲮鱼(体长 28.5 ~ 31.5 cm,湿重 380.3 ~

505.7 g)和 4 条乌鳢(体长 20.5 ~ 24.3 cm,湿重 90.1 ~ 120.8 g)于 2009 年采自广东省清远市龙塘镇某电子垃圾回收点附近一个池塘. 样品采集后立即运回实验室并进行解剖,分离出肌肉、肝脏、鱼子、心脏、肾脏、肠道、鱼鳃、鱼鳞和鱼皮等组织. 鱼样组织分离后分别用二氯甲烷和正己烷淋滤过的铝箔纸包裹,置于 -20℃ 冰箱保存.

### 1.2 试剂材料

标准品: PCBs 回收率指示物(PCB 30、PCB 65 和 PCB 204)、内标(PCB 24、PCB 82 和 PCB 198)以及 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 回收率指示物(3'-MeSO<sub>2</sub>-CB-141)和内标(5-MeSO<sub>2</sub>-CB 91)购自美国 AccuStandards 公司. 丙酮、二氯甲烷和正己烷均为分析纯,全玻璃系统蒸馏后使用. 浓硫酸为优级纯,购于广州化学试剂厂;硅胶(80 ~ 100 目)、中性氧化铝(100 ~ 200 目)分别购于青岛海洋化工厂、江苏强盛化工有限公司,经二氯甲烷索式抽提、干燥和活化处理后使用. 所用玻璃器皿经铬酸洗液洗涤后于 450℃ 马弗炉烘烤,使用前依次用丙酮、二氯甲烷、正己烷清洗.

### 1.3 样品处理

鱼类组织样品的处理和分析主要参考文献[13],有少许改动,简述如下:冻干的样品(肌肉只取 2 g,其它组织取全部)磨成粉末后,加入无水硫酸钠混合均匀,并添加一定量的回收率指示物后,用丙酮/正己烷(体积比 1:1)索氏抽提 48 h. 抽提液浓缩后,转换溶剂为正己烷,并定容至 10 mL. 取 1 mL 样品用重量法测定脂肪含量;剩余 9 mL 样品用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 除脂,上层含有 PCBs 组分的有机相水洗除酸、无水硫酸钠除水后,经旋转蒸发浓缩后过中性硅胶/酸性硅胶复合柱,分离并纯化 PCBs 组分;下层含有 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 组分的浓硫酸相,先用 6 mL 超纯水稀释,待冷却后用 6 mL 正己烷萃取 2 次,有机相用蒸馏水洗至中性,然后过无水硫酸钠除去水分,经旋转蒸发浓缩后过中性硅胶/氧化铝复合柱净化分离 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 组分. 净化后的样品经旋转蒸发,并在温和氮气下浓缩后用异辛烷定容至 200 μL,进 GC-MS 仪器分析前加入内标物.

### 1.4 仪器分析

PCBs 的定量分析采用安捷伦气相色谱-质谱联用仪(6890-5975B GC-EI-MS),色谱柱为 DB-5MS(60 m × 0.25 mm i. d., 0.25 μm film thickness). 选择离子扫描模式(SIM),无分流进样,进样量 1 μL. 载气为高纯氮气,进样口、离子源温度和界面温度

分别为 290、250 和 290℃, 柱流速为 1.1 mL·min<sup>-1</sup>. 升温程序: 起始温度 120℃, 6℃·min<sup>-1</sup> 升温至 180℃, 1℃·min<sup>-1</sup> 升温至 240℃, 然后以 6℃·min<sup>-1</sup> 升温至 290℃ 并保留 17 min.

MeSO<sub>2</sub>-PCBs 含量分析采用安捷伦气相色谱-质谱联用仪 (6890-5975C GC-ECNI-MS), 色谱柱采用 DB-XLB (30 m × 0.25 μm i. d., 0.25 μm of film thickness) 色谱柱. 升温程序及其他色谱条件参见文献[7].

对手性 PCBs 的分析采用安捷伦气相色谱-质谱联用仪 (6890-5975B GC-EI-MS), 分别使用 Chirasil-Dex (25 m × 0.25 mm i. d. × 0.25 μm film thickness) 和 BGB-172 (30 m × 0.25 mm i. d. × 0.18 μm film thickness) 两根色谱柱进行拆分. 升温程序及其他色谱条件参见文献[14].

### 1.5 对映体分数(EF) 的计算

PCBs 在环境样品中的手性组成一般用对映体分数(EF) 表示, 其计算公式为:

$$EF = \frac{E_1}{E_1 + E_2}$$

当手性 PCBs 在色谱柱上的出峰顺序不确定时,  $E_1$  表示手性化合物第 1 个出峰的对映体,  $E_2$  表示第 2 个出峰的对映体; 当手性 PCBs 的出峰顺序确定时,  $E_1$  表示 (+) 对映体,  $E_2$  表示 (-) 对映体. 当 EF 为 0.5 时, 表明手性单体为外消旋体. 本研究中 PCB 84、PCB 132、PCB 136、PCB 149 和 PCB 176 的出峰顺序确定, 均为 (-) 对映体先出峰.

### 1.6 质量保证和质量控制(QA/QC)

实际样品分析前增加 QA/QC 控制样品分析, 包括空白加标和基质加标分析. 同时, 在样品分析时, 每批样品设置一个流程空白作为实验室背景干扰, 并在所有样品中加入回收率指示物标样, 用于监控整个操作过程的回收率.

空白加标样品中, 23 种 PCBs 单体和 17 种 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 单体的平均回收率分别为 76% ~ 102% 和 81% ~ 116%. 实验过程中, 流程空白样品中检测到少量 PCBs (检出量低于样品量的 1%), MeSO<sub>2</sub>-PCBs 则无检出. PCB 30, 65, 204 和 3'-MeSO<sub>2</sub>-CB 141 的回收率分为 87% ~ 116%、83% ~ 106%、96% ~ 114% 和 74% ~ 104%. 方法检出限 (MDL) 以 10 倍信噪比 (S/N) 计, PCBs 和 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 的检出限 (湿重, 下同) 分别为 6 ~ 59 pg·g<sup>-1</sup> 和 1 ~ 12 pg·g<sup>-1</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 PCBs 的含量水平、组织分配及同系物组成特征

本研究共检出 115 种 PCBs 单体, 鲮鱼和乌鳢各组织中总 PCBs ( $\sum$  PCBs) 的平均含量 (湿重) 分别为 560 ~ 10 462 ng·g<sup>-1</sup> 和 580 ~ 50 492 ng·g<sup>-1</sup>. 本研究电子垃圾地区鲮鱼体内 PCBs 的含量比国内另一电子垃圾地区的含量 (平均值, 8.62 ng·g<sup>-1</sup>) 高 2 个数量级以上<sup>[10]</sup>, 这可能和两地区拆解的电子垃圾种类有很大关系. 乌鳢各组织中  $\sum$  PCBs 含量都高于鲮鱼相应组织 (图 1), 这与两种鱼不同的食性和

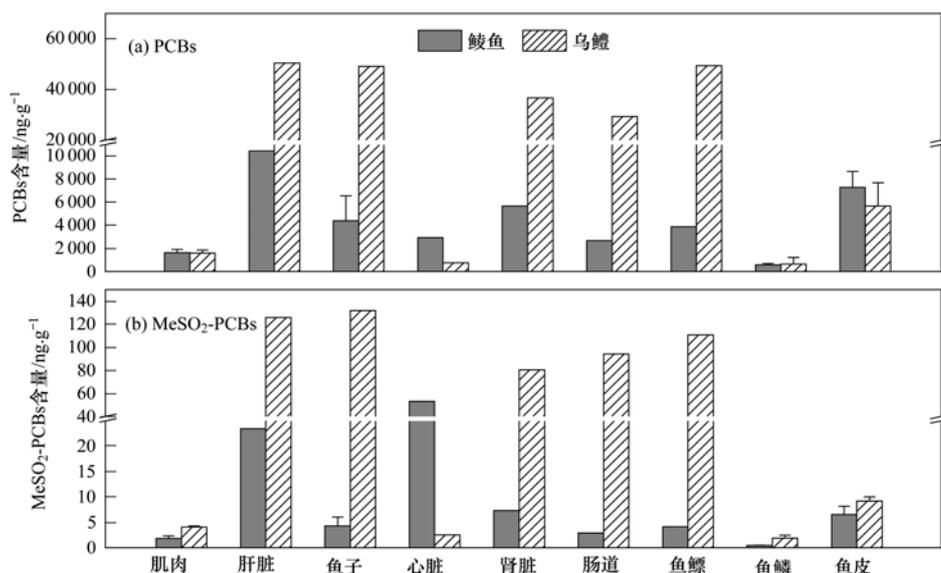


图 1 鲮鱼和乌鳢各组织中 PCBs 和 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 的含量

Fig. 1 Total concentrations of PCBs and MeSO<sub>2</sub>-PCBs in tissues of mud carp and northern snakehead.

营养级有关。鲢鱼是一种滤食性鱼类,主要以浮游动植物和/或沉积物中的腐殖质为食<sup>[15]</sup>;而乌鳢是一种肉食性鱼类,捕食其他鱼类(包括鲢鱼),较高的营养级使得其体内更容易富集较高浓度的 PCBs。

最高的  $\sum$  PCBs 含量均出现在鱼的肝脏样品中。鲢鱼肝脏中的  $\sum$  PCBs 含量比肌肉和鱼鳞高出约 1~2 个数量级,是心脏和肠道的 4 倍,肾脏、鱼子和鱼鳔的 2 倍;而乌鳢肝脏中  $\sum$  PCBs 的含量比肌肉、心脏、鱼皮和鱼鳞高出约 1~2 个数量级(鲢鱼肌肉、肝脏、鱼子、心脏、肾脏、肠道、鱼鳔、鱼鳞和鱼皮  $\sum$  PCBs 平均值分别为 1 620、10 462、4 402、2 957、5 672、2 666、3 900、566 和 7 307  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ;乌鳢肌肉、肝脏、鱼子、心脏、肾脏、肠道、鱼鳔、鱼鳞和鱼皮  $\sum$  PCBs 的平均值分别为 1 604、50 492、49 164、759、36 640、29 328、49 349、580 和 5 687  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )。

鲢鱼体内各组织 PCBs 的平均含量从高到低顺序为:肝脏>鱼皮>肾脏>鱼子>鱼鳔>心脏>肠道>肌肉>鱼鳞;而在乌鳢体内这一顺序从高到低为:肝脏>鱼鳔>鱼子>肾脏>肠道>鱼皮>肌肉>心脏>鱼鳞(图 1)。本研究中检测到的 PCBs 的组织分布与波罗的海鳕鱼的组成类似(肝脏>生殖腺>肌肉)<sup>[16]</sup>,与采自 Newark Bay 和 Hudson River Estuary 的底鳕鱼略有不同,该研究中 PCBs 的含量依次为生殖腺>肝脏>肌肉<sup>[17]</sup>。PCBs 在鱼体各

组织内的分配可能与其脂肪含量有关,鲢鱼各组织脂肪含量分别为 0.27% (鱼鳞)~7.3% (肝脏),乌鳢各组织的脂肪含量位于 0.20% (鱼鳞)~13% (鱼子)之间。线性相关分析表明,两种鱼体内各组织 PCBs 的含量与其脂肪含量(以湿重计)具有显著相关性(鲢鱼,  $R^2 = 0.63, P < 0.005$ ; 乌鳢,  $R^2 = 0.92, P < 0.001$ , 图 2)。此结果与之前的研究结果一致<sup>[17]</sup>,表明 PCBs 倾向于在高脂肪含量的组织内富集。

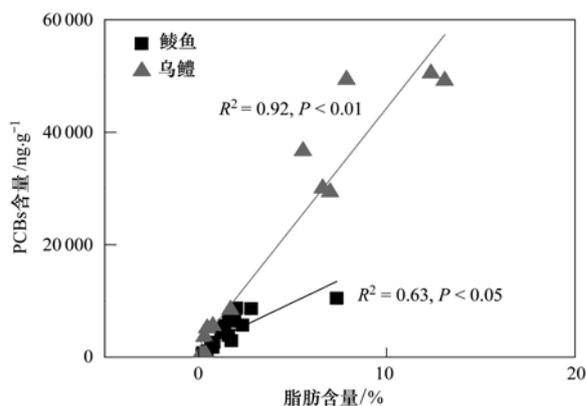


图 2 鲢鱼和乌鳢体内 PCBs 含量与脂肪含量的关系

Fig. 2 Relationship of PCBs concentrations to lipid contents in fish tissues

鲢鱼和乌鳢各组织具有相似的 PCBs 同族体组成,均以 4、5 和 6 氯取代单体为主,约占 PCBs 总量的 80% (图 3)。这与大连、天津和上海等地的鱼类 PCBs 组成主要为六氯取代物略有不同<sup>[18]</sup>。同时,

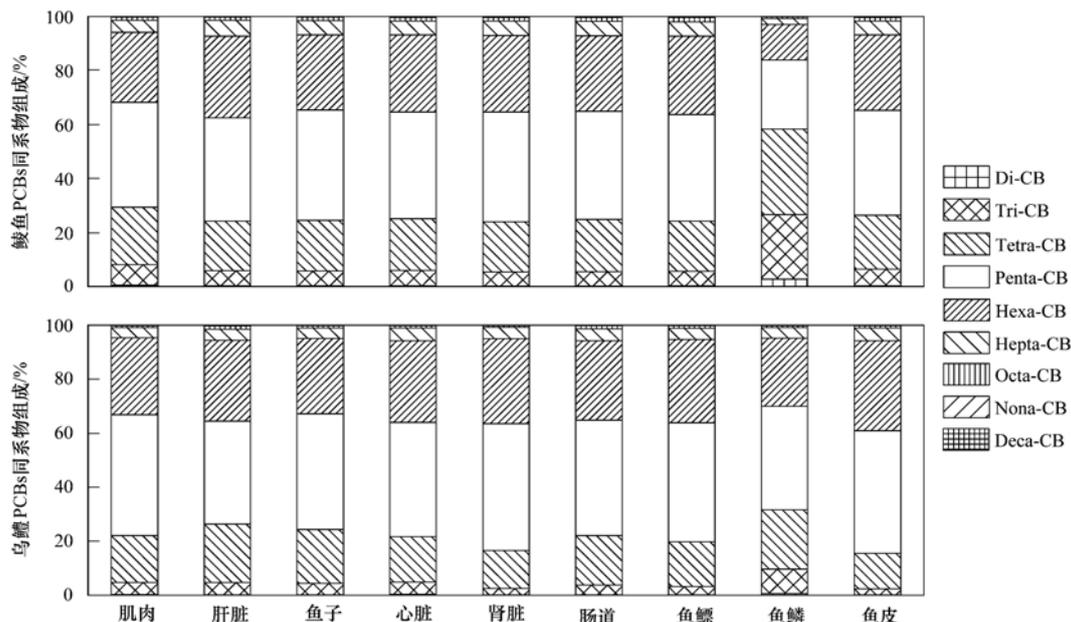


图 3 鲢鱼和乌鳢各组织中 PCBs 的同系物组成

Fig. 3 Compositions of PCB homologues in tissues of mud carp and northern snakehead

数据显示,除鱼鳞外,同种鱼类各组织的 PCBs 同系物组成无显著差异. 鱼鳞中低氯取代 PCBs 单体的贡献要高于其他组织,其同族体组成与之前研究的该池塘水体中 PCBs 的同族体组成<sup>[11]</sup>相类似,可能是因为鱼鳞与水体直接接触,且与鱼体内其他组织的物质交换能力较弱,所以更多反映的是水体中 PCBs 的组成特征. Monosson 等<sup>[17]</sup>对美国 Newark Bay 和 Hudson River Estuary 的底鳉鱼进行研究,结果显示底鳉鱼的肌肉、肝脏和生殖腺内 PCBs 的同系物组成无显著差异,相似的同系物组成在葡萄牙 Reo de Averno 的黑鲈鱼肌肉和肝脏内也有发现<sup>[19]</sup>.

## 2.2 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 的含量水平、组织分配及同系物组成特征

在鱼类组织样品中共检测到 17 种 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 单体,分别为 3'-MeSO<sub>2</sub>-CB49、4'-MeSO<sub>2</sub>-CB49、3'-MeSO<sub>2</sub>-CB87、4'-MeSO<sub>2</sub>-CB87、3'-MeSO<sub>2</sub>-CB95、4'-MeSO<sub>2</sub>-CB95、3'-MeSO<sub>2</sub>-CB101、4'-MeSO<sub>2</sub>-CB101、4-MeSO<sub>2</sub>-CB110、5-MeSO<sub>2</sub>-CB110、4'-MeSO<sub>2</sub>-CB132、5'-MeSO<sub>2</sub>-CB132、4'-MeSO<sub>2</sub>-CB141、4-MeSO<sub>2</sub>-CB149、5-MeSO<sub>2</sub>-CB149、4'-MeSO<sub>2</sub>-CB174 和 5'-MeSO<sub>2</sub>-CB174. 鲮鱼和乌鳢各组织中  $\sum$  MeSO<sub>2</sub>-PCBs 的平均含量(湿重)分别为 0.44 ~ 53 ng·g<sup>-1</sup>、1.86 ~ 132 ng·g<sup>-1</sup>. 相比于其他组织而言,在鲮鱼心脏中检测到的  $\sum$  MeSO<sub>2</sub>-PCBs 含量最高,而在乌鳢体内鱼子中检测到的含量最高. 此外,鲮鱼的肝脏以及乌鳢的肝脏、肾脏、肠道和鱼鳃等也都检测到相当含量的 MeSO<sub>2</sub>-PCBs(图 1). 鱼鳞中的  $\sum$  MeSO<sub>2</sub>-PCBs 含量最低. MeSO<sub>2</sub>-PCBs 的组织分配与 PCBs 分配类似(图 1). 鱼体内各组织 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 的含量与其脂肪含量(以湿重计)显著相关(鲮鱼,  $R^2 = 0.98, P < 0.0001$ ; 乌鳢  $R^2 = 0.96, P < 0.0001$ ,图 4).

本研究中检测到的肝脏组织中的  $\sum$  MeSO<sub>2</sub>-PCBs 的平均含量(鲮鱼和乌鳢分别为 23.5 ng·g<sup>-1</sup>和 126 ng·g<sup>-1</sup>,湿重)比北极沿海的杜父鱼( $< 0.4$  ng·g<sup>-1</sup>,湿重)<sup>[20]</sup>高出 1~2 个数量级. 鲮鱼(290 ng·g<sup>-1</sup>,脂重)和乌鳢(985 ng·g<sup>-1</sup>,脂重)的肌肉组织中  $\sum$  MeSO<sub>2</sub>-PCB 含量比密歇根湖的深水杜父鱼(7.0 ng·g<sup>-1</sup>,脂重)和淡水鳕鱼(40 ng·g<sup>-1</sup>,脂重)高出 1~2 个数量级<sup>[21]</sup>. 其它组织由于缺乏相关研究,所以没作比较. 本研究中检测到的  $\sum$  MeSO<sub>2</sub>-PCBs 含量与鸟类、海洋以及陆生哺

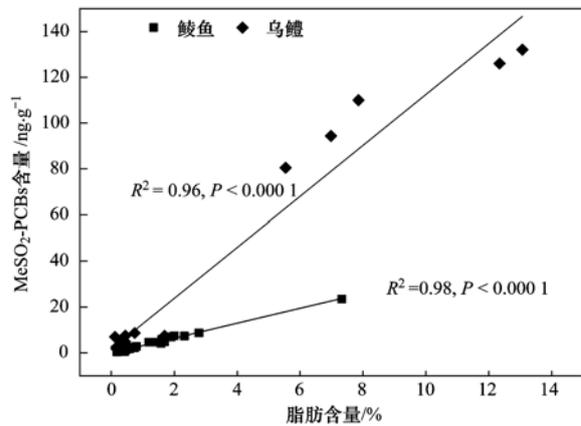


图 4 鲮鱼和乌鳢体内 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 含量与脂肪含量的关系

Fig. 4 Relationship of MeSO<sub>2</sub>-PCBs concentrations to lipid contents in fish tissues

乳动物以及人类等检测的结果相当甚至更高<sup>[5, 8]</sup>. 结果表明,该电子垃圾回收地区的鱼类除受到 PCBs 的污染外,还受到其高浓度的代谢产物污染. 鱼体内高浓度的 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 可能通过食物链在人体内富集,进而对当地居民的身体健康造成影响.

鲮鱼和乌鳢各组织中 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 的组成都比较类似. 3'-和 4'-MeSO<sub>2</sub>-CB87、3'-和 4'-MeSO<sub>2</sub>-CB101、4-MeSO<sub>2</sub>-CB110、4'-和 5'-MeSO<sub>2</sub>-CB132 以及 4-MeSO<sub>2</sub>-CB149 是两种鱼体内最主要的单体,占  $\sum$  MeSO<sub>2</sub>-PCBs 的 60% 以上. 美国密歇根湖的杜父鱼中也检测到 3'-MeSO<sub>2</sub>-CB101 和 4-MeSO<sub>2</sub>-CB149 占有较高的组成(>50%)<sup>[21]</sup>; 而 5-MeSO<sub>2</sub>-CB149 (8.9%) 和 4'-MeSO<sub>2</sub>-CB-174 (23.9%) 所占的比例则比本研究的鱼体内(<1%)高,这可能与它们不同的 PCBs 暴露或者代谢能力有关. 在其它野生动物以及人体内也检测到 3'-MeSO<sub>2</sub>-CB87, 3'-和 4'-MeSO<sub>2</sub>-CB101 以及 4-MeSO<sub>2</sub>-CB149 为主要的组成单体<sup>[5, 8]</sup>.

MeSO<sub>2</sub>-PCBs 与其母体 PCBs 的浓度比值常用来评价鱼类对 PCBs 的代谢能力. 本研究中计算得到的鲮鱼和乌鳢体内的 MeSO<sub>2</sub>-PCB<sub>x</sub>/PCB<sub>x</sub> 分别为 0.0001~0.027 和 0.0002~0.063,比美国密歇根湖的杜父鱼体内的比值(平均值 0.09,范围 <0.001~0.36)低约 1 个数量级<sup>[21]</sup>. 结果表明,本研究中鲮鱼和乌鳢的 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 代谢能力要低于杜父鱼,尽管本研究中检测到较高的 PCBs 含量. 此外,本研究中 MeSO<sub>2</sub>-PCB95/PCB95 的比值(鲮鱼和乌鳢体内分别为 0.01~0.027 和 0.03~0.063)显著高于其它单体的比值,表明 PCB95 在鱼体内比其它

单体更容易代谢。

### 2.3 PCBs 的手性特征

本研究共检测到 9 种手性 PCBs 单体 (PCB84、91、95、132、135、136、149、174、183) 在鱼体各组织中的组成特征。为了更好地说明鱼体内 PCBs 的 EF 值变化特征,笔者对采自同一池塘的沉积物中 PCBs 的手性特征进行了检测。沉积物及鱼类样品中各手性 PCBs 单体的 EF 值如(图 5)所示。沉积物中各手性单体均为外消旋 (EFs 值介于  $0.493 \pm 0.003$  至  $0.521 \pm 0.034$  之间),表明沉积物中微生物对这些手性单体的对映体选择性代谢能力较弱。已有较多研究在鱼体内检测到了非外消旋的手性 PCBs<sup>[9, 22, 23]</sup>, 本研究中 PCB149 的 EF 值在沉积物、鲢鱼及乌鳢中均无显著差别,表明该单体可能不存在手性选择性富集或降解过程。乌鳢体内 PCB91、PCB136 和 PCB183 的 EF 值与对应的沉积物相比无

明显差异,显示为外消旋混合物,但与鲢鱼相比乌鳢的 EF 值均存在显著的增加。而鲢鱼与沉积物相比 EF 值存在显著降低。由于鲢鱼是乌鳢的主要食物,乌鳢体内相关 EF 值的上升可能预示乌鳢与鲢鱼存在不同的手性选择性代谢特征。这使得在鲢鱼体内已经下降的 EF 值在经过了乌鳢进一步的选择性代谢后,EF 值又出现了回升。其它单体中也存在这种现象,如 PCB84、PCB135 在鲢鱼体内 EF 值小于沉积物,但在乌鳢体内则大于沉积物。这些结果表明两种鱼倾向于选择性地代谢不同的对映体。但需要指出的是,鱼体内 PCBs 的手性特征既可能是其自身进行对映体选择性代谢的结果,也有可能是通过摄食作用富集食物中的手性 PCBs 并继承其手性特征<sup>[9]</sup>。乌鳢除捕食鲢鱼作为部分食物来源,还可捕食其他水生昆虫、虾类和鱼类等,故乌鳢体内 PCBs 的手性特征除了其自身的代谢外,还与其广泛的食

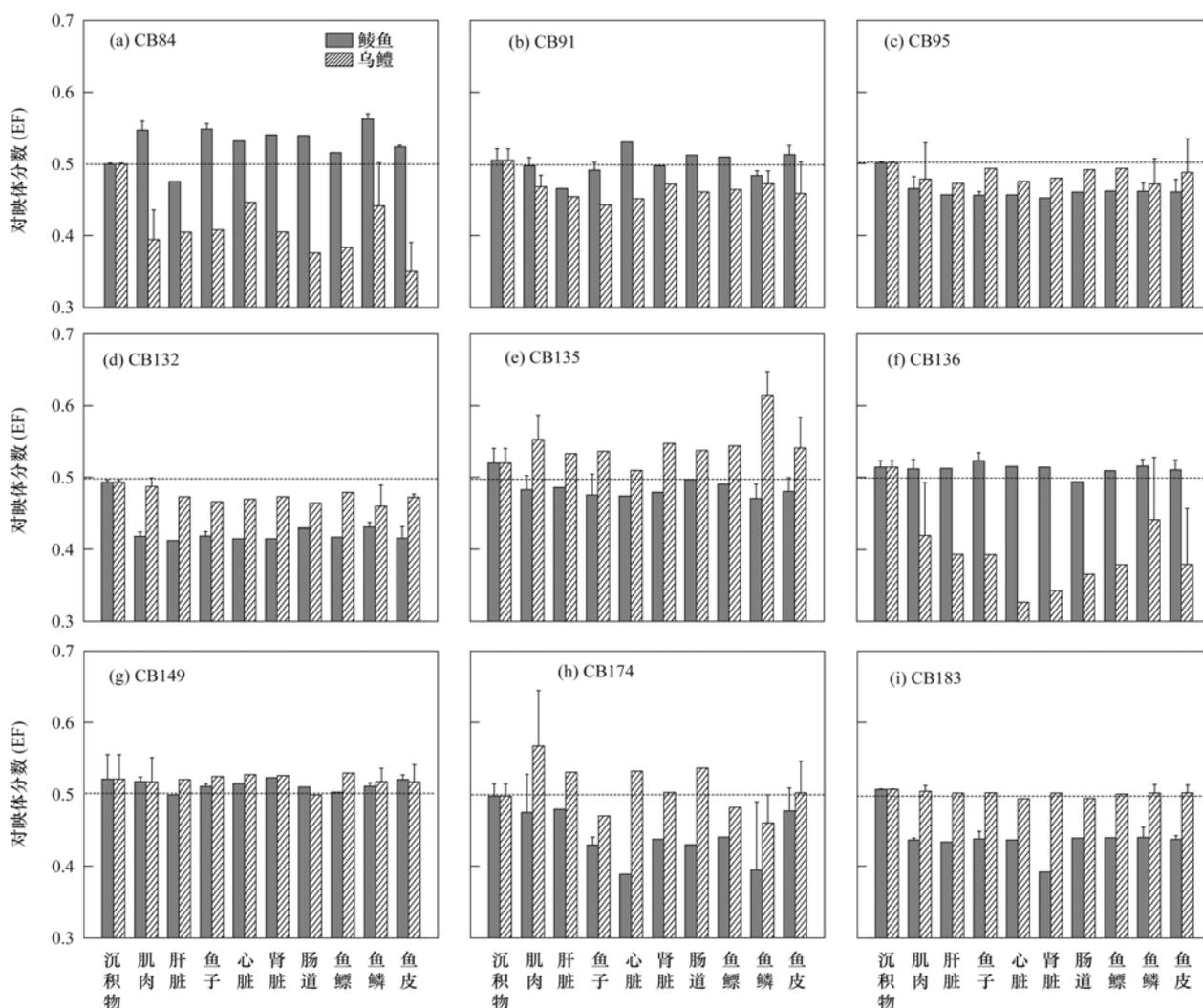


图 5 沉积物及样品中手性 PCBs 单体的 EF 值

Fig. 5 Enantiomer Fractions (EFs) of chiral PCB congeners in sediment and tissue samples

物来源有关. 两种鱼体内 PCBs 的手性变化特征, 表明鱼体内手性 PCBs 单体的代谢和富集因其自身的代谢过程以及食物吸收而具有物种差异性和单体特异性.

### 3 人体暴露风险评价

鲢鱼和乌鳢是中国居民普遍食用的鱼类. 电子垃圾地区受污染鱼类被当地居民捕获后一般运到集市出售, 这给当地居民带来非常高的暴露风险. 由于鱼类对 PCBs 的生物累积, 污染物可通过食用鱼类而进入人体, 进而危害人体健康. 因此, 食用鱼类摄入的 PCBs 含量也应加以考虑. 鉴于肌肉是人们食用的主要部分, 评价食用鱼类的 PCBs 摄入量以肌肉中 PCBs 的含量乘以人均日消费量计算. 按照农村居民人均  $38.50 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$  的鱼类消费量 (以  $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$  计)<sup>[24]</sup>, 鲢鱼和乌鳢鱼肌肉的  $\sum$  PCBs 平均含量分别为  $1620 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $1604 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 居民食用这些受污染鱼类后, 每日的暴露量将高达  $62 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ . 在两种鱼类体内还检测到了 8 种二噁英类多氯联苯, 其中包括 2 种非邻位 PCBs (CB77, CB126) 和 6 种单邻位 PCBs (CB105、CB114、CB118、CB123、CB156、CB167), 根据世界卫生组织公布的 PCBs 毒性当量因子 (TEFs)<sup>[25]</sup> 计算鲢鱼和乌鳢各组织中的 PCBs 毒性当量 (TEQ) (湿重) 分别为  $0.04 \sim 2.52 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.01 \sim 9.31 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 表明较高的毒性暴露风险.

以上估算有可能高估了 PCBs 的暴露水平, 因为计算时是以湿重计的, 在烹煮的过程中, PCBs 会随着脂肪的流失而损失掉约 30%<sup>[26]</sup>. 此外, 其他地方捕捞的鱼类也会进入当地市场销售, 这些地方的鱼类通常 PCBs 的含量较低, 如果遗漏这些鱼类的消费, 则有可能高估了饮食暴露的水平. 尽管以上估算高估了当地居民的暴露水平, 但相关数据表明限制这些鱼类在市场的流通对于降低当地居民健康风险具有重要意义.

### 4 结论

(1) 鱼体组织内检测到高含量的 PCBs 和 MeSO<sub>2</sub>-PCBs 表明电子垃圾拆卸区由于不规范的拆卸活动已受到了严重的污染. 电子垃圾区 PCBs 代谢产物也是不容忽视的一类污染物, 具有潜在的毒性, 并可通过食物链影响人体健康.

(2) PCBs 在鱼体各组织内的分布与其脂肪含量有关, PCBs 倾向于在高脂肪含量的组织内富集,

鱼体对手性 PCBs 具有对映体选择性代谢作用并且两种鱼对 PCB 手性选择性正好相反.

(3) 食用这些受电子垃圾污染的鱼类具有较高的暴露风险, 限制这些鱼类在市场的流通对于降低当地居民健康风险具有重要意义.

#### 参考文献:

- [1] 毕新慧, 徐晓白. 多氯联苯的环境行为[J]. 化学进展, 2000, 12(2): 152-160.
- [2] Cohn B A, Cirillo P M, Sholtz R I, *et al.* Polychlorinated biphenyl (PCB) exposure in mothers and time to pregnancy in daughters [J]. Reproductive Toxicology, 2011, 31(3): 290-296.
- [3] Glynn A, Larsdotter M, Aune M, *et al.* Changes in serum concentrations of polychlorinated biphenyls (PCBs), hydroxylated PCB metabolites and pentachlorophenol during pregnancy [J]. Chemosphere, 2011, 83(2): 144-151.
- [4] Liu H X, Zhou Q F, Wang Y W, *et al.* E-waste recycling induced polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo-furans pollution in the ambient environment [J]. Environment International, 2008, 34(1): 67-72.
- [5] Letcher R J, Klasson-Wehler E, Bergman A. The Handbook of Environmental Chemistry, Volume 3K: Anthropogenic compounds[M]. Heidelberg: Springer, 2000. 315-359.
- [6] Routti H, Letcher R J, Arukwe A, *et al.* Biotransformation of PCBs in relation to phase I and II xenobiotic-metabolizing enzyme activities in ringed seals (*Phoca hispida*) from svalbard and the Baltic Sea [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(23): 8952-8958.
- [7] 张茨, 吴江平, 罗孝俊, 等. 生物样品中甲磺基多氯联苯的测定及手性拆分[J]. 环境化学, 2012, 31(8): 1165-1170.
- [8] Jörundsdóttir H, Norström K, Olsson M, *et al.* Temporal trend of bis(4-chlorophenyl) sulfone, methylsulfonyl-DDE and-PCBs in Baltic Guillemot (*Uria aalge*) egg 1971 - 2001 - A comparison to 4, 4'-DDE and PCB trends [J]. Environmental Pollution, 2006, 141(2): 226-237.
- [9] Lehmler H J, Harrad S J, Huhnerfuss H, *et al.* Chiral polychlorinated biphenyl transport, metabolism, and distribution: A review [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(8): 2757-2766.
- [10] Xing G H, Chan J K Y, Leung A O W, *et al.* Environmental impact and human exposure to PCBs in Guiyu, an electronic waste recycling site in China [J]. Environment International, 2009, 35(1): 76-82.
- [11] Wu J P, Luo X J, Zhang Y, *et al.* Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in wild aquatic species from an electronic waste (e-waste) recycling site in South China [J]. Environment International, 2008, 34(8): 1109-1113.
- [12] Meng X Z, Zeng E Y, Yu L P, *et al.* Persistent halogenated

- hydrocarbons in consumer fish of China: Regional and global implications for human exposure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(6): 1821-1827.
- [13] Gebbink W A, Sonne C, Dietz R, *et al.* Tissue-specific congener composition of organohalogen and metabolite contaminants in East Greenland polar bears (*Ursus maritimus*) [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(3): 621-629.
- [14] 张茨, 吴江平, 罗孝俊, 等. 生物样品中手性多氯联苯对映体的分离测定 [J]. *分析测试学报*, 2012, **31**(9): 1146-1150.
- [15] deBruyn A M H, Gobas F A P C. Modelling the diagenetic fate of persistent organic pollutants in organically enriched sediments [J]. *Ecological Modelling*, 2004, **179**(3): 405-416.
- [16] Dabrowska H, Bernard E, Barska I, *et al.* Inter-tissue distribution and evaluation of potential toxicity of PCBs in Baltic cod (*Gadus morhua* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, **72**(7): 1975-1984.
- [17] Monosson E, Ashley J T F, McElroy A E, *et al.* PCB congener distributions in muscle, liver and gonad of *Fundulus heteroclitus* from the lower Hudson River Estuary and Newark Bay [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(4): 777-787.
- [18] Yang N Q, Matsuda M, Kawano M, *et al.* PCBs and organochlorine pesticides (OCPs) in edible fish and shellfish from China [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(8): 1342-1352.
- [19] Antunes P, Gil O. PCB and DDT contamination in cultivated and wild sea bass from Ria de Aveiro, Portugal [J]. *Chemosphere*, 2004, **54**(10): 1503-1507.
- [20] Bright D A, Grundy S L, Reimer K J. Differential bioaccumulation of non-ortho-substituted and other PCB congeners in coastal Arctic invertebrates and fish [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, **29**(10): 2504-2512.
- [21] Stapleton H M, Letcher R J, Baker J E. Metabolism of PCBs by the deepwater Sculpin (*Myoxocephalus thompsoni*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(24): 4747-4752.
- [22] Wong C S, Mabury S A, Whittle D M, *et al.* Organochlorine compounds in Lake Superior: Chiral polychlorinated biphenyls and biotransformation in the aquatic food web [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(1): 84-92.
- [23] Dang V D, Walters D M, Lee C M. Transformation of chiral polychlorinated biphenyls (PCBs) in a stream food web [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(8): 2836-2841.
- [24] 国家统计局. 中国统计年鉴 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2010/indexch.htm>, 2009.
- [25] Van den Berg M, Birnbaum L S, Denison M, *et al.* The 2005 World Health Organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds [J]. *Toxicological Sciences*, 2006, **93**(2): 223-241.
- [26] Fitzgerald E F, Hwang S A, Bush B, *et al.* Fish consumption and breast milk PCB concentrations among mohawk women at akwesasne [J]. *American Journal of Epidemiology*, 1998, **148**(2): 164-172.

## CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing .....	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou .....	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM <sub>2.5</sub> and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan .....	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM <sub>2.5</sub> in Urban Chengdu, China .....	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing .....	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing .....	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China .....	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region .....	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO <sub>2</sub> .....	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles .....	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion .....	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer .....	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River .....	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River .....	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins .....	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake .....	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas .....	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands .....	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body .....	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO <sub>2</sub> on the Release and Activation of Mercury in Sediment .....	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China .....	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park .....	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors .....	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater .....	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation .....	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment .....	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment .....	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter .....	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge .....	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal .....	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region .....	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure .....	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong .....	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island .....	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO <sub>2</sub> and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates .....	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season .....	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain .....	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb .....	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site .....	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality .....	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years .....	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures .....	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO <sub>2</sub> Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH <sub>3</sub> .....	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry .....	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry .....	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

## 环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年12月15日 第35卷 第12期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行